

文章编号: 1000-7598 (2013) 01-0080-06

粉性土毛管水的力学和工程特性

吴世余¹, 余金煌^{1,2}

(1. 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 安徽 蚌埠 233000; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 阐述了毛管水对土体强度、变形和渗流的影响。粉性土既有较高的毛管水头, 又有一定的渗透性, 水压传递快; 毛管水对此类土地基、基坑和堤坝等工程有明显的影响。研究的主要成果有: ①根据试样浸水与否的无侧限抗压强度比较试验及理论分析, 证明毛管水张力增高了土体强度, 强度增高的数值, 试验结果和理论分析相符; ②计算分析雨季粉性土地表层毛管水张力消失和土体膨胀的过程; ③借砂模试验和电拟试验, 分析了毛管水对堤坝渗流流态的影响, 毛管水增高了渗流量和出逸点高度; ④提出了砂土和粉性土毛管水头 h_c 和渗透系数 k 新的经验计算式。研究成果可应用于粉性土地基、基坑和堤坝等工程。

关 键 词: 毛管水; 粉土; 强度; 固结; 渗流

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Mechanical and engineering characteristics of capillary water of silty soils

WU Shi-yu¹, YU Jin-huang^{1,2}

(1. Anhui and Huaihe River Water Resources Research Institute, Bengbu, Anhui 233000, China;

2. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: This paper deals with the influence of capillary water on the strength and deformation of soils, and on the seepage flow state of levees and dams. Silty soils possess both higher water head and higher permeability, water pressure transmitting rapidly. So that the influence of capillary water in the engineering with silty soils is obvious. The principal research results are: ①According to the comparison tests of unconfined compression strength with samples immersed in the water or not, and with theoretical analysis, it has been demonstrated the capillary water head results the further consolidation and strength increasing of the soil. The strength increasing values of the tests are the same as the values of theoretical calculation. ②Analyzing and calculating the decreasing process of capillary water tension accompanied by soil expansion in silty surface strata on heavy rain condition. ③Using electric analog test and sand model test, the influence of capillary water on the seepage flow state of levees and dams is studied. The capillary water results the increasing of the seepage flow quantity and the height of release point. ④Two new empirical formulae of capillary water head and permeability coefficient of sand and silty soils are presented. The research results can be applied to the engineering of foundation foundation pits, levees and dams with silty soils.

Key words: capillary water; silty soils; strength; consolidation; seepage

1 引 言

粉性土包括极细砂、砂壤土、轻粉质壤土、粉砂和粉土等土类, 其砂粒含量小于 30%, 黏粒含量小于 15%, 渗透系数 k 在 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-5}$ cm/s 之间, 毛管水上升高度 h_c 为 50~500 cm。

毛管水在某些特定条件下对土体的强度、变形和渗流都有一定的影响; 对于粉性土, 既有较高的毛管水头, 又有一定的渗透性, 水压传递快, 毛管水的作用尤为明显。本文对此进行了一些探索性研

究。

水和空气的界面上, 由于上下两面分子引力的差异, 产生水体的表面张力; 又由于水与土粒间的附着力大于水体的黏聚力, 使水面在颗粒间呈凹形弯曲面而产生毛管水头。毛管水处于张力状态, 由土骨架压力予以平衡。毛管水头(或张力)的大小和土的颗粒形状、粒径、级配、紧密度、饱和度、水质和温度等有关, 其值须经试验测定。

地下水按高程可概分为 3 区: 自由水面以下为正压力的饱和区, 自由水面至毛管水面为负压力和

收稿日期: 2011-10-08

第一作者简介: 吴世余, 男, 1926 年生, 本科, 教授级高级工程师, 主要从事土工和渗流方面的研究工作。E-mail: qianfu66@163.com

仅含少量封闭性气泡的饱和区，毛管水面以上为非饱和区。现今对于毛管水区的研究^[1-3]偏重于毛管水面以上的张力非饱和区，本文的研究则系针对自由水面和毛管水面之间的毛管水张力饱和区，并不涉及非饱和区。

2 毛管水头的测定方法和近似计算式

2.1 毛管水头 h_c 的测定方法

毛管水上升高度 h_c 有水位上升和水位下降两种测定方法。将干砂填入玻璃管并测定孔隙率 n ，再将盛砂的玻璃管置于水面上，毛管水即渐渐上升，最终达到与孔隙尺寸相应的高度 h_c ，形成毛管水面。毛管水面以下的土基本饱和，仅带有少量封闭性的气泡。毛管水面以上小孔隙群仍吸水，形成非饱和的短窄过渡带，其含气孔隙已与大气相通。根据非饱和带和饱和带颜色上的差别，可据以确定 h_c 。对于渗透性较小的粉土，水位上升达到 h_c 需要很长时间，可根据水位上升的过程以确定 h_c （上升过程后述）。土工试验规程提供的是水位下降法测定毛管水头。盛砂管和盛水管在底部连通，逐渐提高盛水管，使盛砂管进水饱和，并使水面略高出砂面；然后降低盛水管，使水面和砂面齐平；再慢慢降低盛水管，增大两管的水位差，砂面孔隙毛管水的曲率随之渐增；待至某一水位差盛水管水位突然上升，此一水位差即为毛管水头 h_c 。当毛管水面处于拉破前的极限状态，砂面大孔隙内毛管水面的曲率和小孔隙内毛管水面曲率等同，以使砂面的毛管水张力均为 $\gamma_w h_c$ ， γ_w 为水的重度。再降低盛水管水位，则毛管水面也随之下降。毛管水面以上部分仅排出少量水分，但其含气孔隙已与大气连通。根据试验结果，水位下降法测定的 h_c 和水位上升法测定的 h_c ，或两者相当，或前者大于后者。

2.2 毛管水头 h_c 和渗透系数 k_{10} 的经验计算式

对于圆柱形毛细管的上升高度计算公式为^[3]

$$h_c'' = \frac{4f}{d\gamma_w} \quad (1)$$

式中： f 为水的表面张力； d 为毛细管直径。已知在常温 $0\sim 30\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内 f/γ_w 的平均值为 0.075 cm^2 ，若 h_c'' 以 cm 计， d 以 mm 计，则有：

$$h_c'' = \frac{3}{d} \quad (2)$$

前已述及，毛管水上升高度主要由土体的孔隙尺寸控制。设孔隙的等效直径为 δ_L ，根据作者的试验和比较结果， δ_L 约相当于其颗粒分析曲线小于

15%的粒径 d_{15} ；孔隙直径又与土的紧密度有关，设孔隙仅改变大小，而其形状保持不变；那么 $\delta_L = e^{1/3} d_{15}$ ， e 为孔隙比，据此给出土毛管水高度的经验计算式 h_c' 为

$$h_c' = \frac{3}{e^{1/3} d_{15}} \quad (3)$$

经作者对 16 个试样（包括粗中细砂、极细砂、粉砂和轻砂壤土等）进行测定， h_c 在 $15\sim 40\text{ cm}$ 范围内，水位上升法和下降法测定的 h_c 相当； $10\text{ cm} > h_c > 100\text{ cm}$ 范围内，水位下降法的 h_c 大于水位上升法的 h_c ，最大可差到 1 倍。暂取上升法和下降法的均值作为 h_c ，以与近似经验式（3）的 h_c' 比较，其公式为

$$h_c = \beta h_c' \quad (4)$$

式中： h_c 为试样的实测值， h_c' 为按经验计算式（3）计算的近似值， β 为比值。根据作者的试验结果整理 $\beta = 0.8\sim 1.6$ ，85% $\beta = 0.8\sim 1.3$ 。

毛管水压的传递和消散速度与渗透系数 k 有关，现提出 k 的近似计算式。

对于直径 d 圆柱形毛细管的流量计算式为^[4]

$$Q = \frac{\pi I}{128\nu} d^4 \quad (5)$$

式中： Q 为流量； I 为压力坡降； ν 为动黏滞系数。

据式（5）得出圆柱形毛细管的渗透系数为

$$k'' = \frac{d^2}{32\nu} \quad (6)$$

转化为土的渗透系数为

$$k' = \frac{ne^{2/3}(\eta d_{15})^2}{32\nu} \quad (7)$$

式中： n 为孔隙率； ηd_{15} 为等效的孔隙直径， η 为小于 1 的系数。10 $^\circ\text{C}$ 的动黏滞系数 $\nu = 1.338 \times 10^{-5}\text{ cm} \cdot \text{s}$ ， k' 的单位设为 cm/s ， d_{15} 的单位设为 mm 。据此得出 10 $^\circ\text{C}$ 土渗透系数的经验计算式 k'_{10} 为

$$k'_{10} = 23.36ne^{2/3}\eta^2 d_{15}^2 \quad (8)$$

根据作者 41 个试样的试验结果统计 k'_{10} 为

$$k'_{10} = 2.2ne^{2/3} d_{15}^2 \quad (9)$$

令式（8）和式（9）相等，得 $\eta = 0.31$ 。计算 k'_{10} 的等效孔隙直径小于计算 h_c' 的等效孔隙直径的原因，估计系因渗径系由大小不等的孔隙串联组成，

而平均流速又系由小孔隙控制之故。经验式 (9) 计算的近似值和实测值比较结果为

$$k_{10} = \alpha k'_{10} \quad (10)$$

式中: k_{10} 为试样的实测值, k'_{10} 为按经验式 (6) 计算的近似值, α 为比值。由 41 个试样的结果整理 $\alpha = 0.5 \sim 1.8$, $80\% \alpha = 0.7 \sim 1.4$, 最大误差约减半或加倍。

习惯上常用的 h'_c 、 k' 经验计算式有^[5]: $h'_c = 4.5/(ed_{10})$ (太沙基 1955 年公式), $k' = 2e^2 d_{10}^2$, h'_c 、 k' 、 d_{10} 的单位同前。前者较式 (3) 大一倍左右, 后者与式 (9) 比较接近, 但未标出温度 (温度对 k 的影响为: $k_{28} = 1.8k_5$)。

3 毛管水对土体强度和变形的影响

3.1 毛管水对土体强度的影响

对饱和粉性土, 按常规试样不浸水和试样在浸水条件下分别测定两种不同的无侧限抗压强度, 借以分析毛管水的影响。中密以上的砂土和粉性土在受剪时颗粒间锁扣错动, 使土体膨胀, 在饱和试样表面形成孔隙水的弯液面, 产生毛管水头 h_c 和相应的毛管水张力 $\sigma_c = \gamma_w h_c$; 同时在试样骨架上增加一各向均等的附加压力 σ_c , 遂使抗剪和无侧限抗压强度增加。

饱和粉性土排水剪 (剪力盒内注水) 的凝聚力 $c = 12 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$; 常规不浸水无侧限抗压强度 $q_u = 87 \text{ kPa}$; 试样浸水中的无侧限抗压强度 $q'_u = 41 \text{ kPa}$ 。按排水剪强度 $S-P$ 曲线绘 Mohr 圆如图 1 所示, 求出 $q'_u = 42 \text{ kPa}$, 与浸水的无侧限抗压试验相符。按常规方法进行的无侧限抗压试验, 受剪土体膨胀, 产生毛管张力 σ_c , 使试样的有效压力增加, 无侧限抗压强度 $q_u = 87 \text{ kPa}$ 。于图 1 中绘一平行于破裂线, 相距 $q_u/2$ 的直线交 σ' 轴于一点; 以此点为圆心, 绘出相切于破裂线的 Mohr 圆, 得出试样在极限状态下的有效主应力 σ'_1 和 σ'_3 。 $\sigma'_3 = 23 \text{ kPa}$, 即为毛管水张力 σ_c , 而 σ'_1 为 σ_c 和 q_u 之和, $\sigma'_1 = 23 + 87 = 110 \text{ kPa}$ 。实测毛管水头 220 cm , 相应的毛管水张力为 22 kPa , 与上述分析及图 1 相符。

对于中密以上的粉性土和砂性土, 浸水的直剪和浸水的无侧限抗压是排水剪, 而常规不浸水的无侧限抗压是不排水剪。广义“排水”系指压缩时能排水, 膨胀时能吸水, 以清除正负孔隙水压力。中密以上的粉性土和砂性土, 受剪时土体膨胀, 如有水源供水, 则无孔隙水压力; 反之, 如无水源供水, 则将随剪切过程逐渐增加负孔隙水压力, 负压水头

的极限为毛管水头 h_c (上述试验也验证了这一论点)。

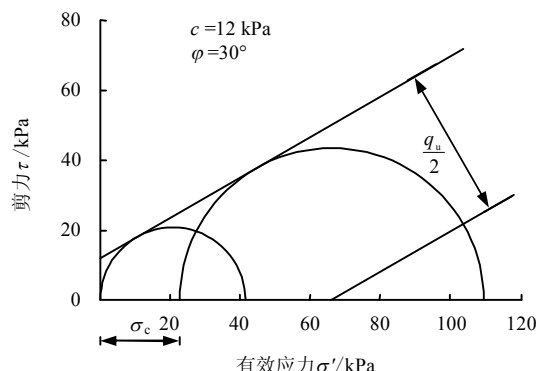


图 1 毛管水张力下土体的无侧限抗压强度

Fig.1 Unconfined compression strength of soils with tension of capillary water

设 σ_1 、 σ_3 为外加主应力, σ'_1 、 σ'_3 为有效主应力, $\sigma_c = \gamma_w h_c$, 为相应于毛管水头 h_c 的毛管水张力; σ'_c 为实际的毛管水张力。 $\sigma'_c \leq \sigma_c$, 极限为 σ_c 。根据 Mohr-Coulomb 准则列出下列极限平衡式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \tan(45^\circ + \varphi/2) + \\ &\quad \sigma'_c [\tan^2(45^\circ + \varphi/2) - 1] \\ \sigma_3 &= \sigma_1 \tan^2(45^\circ - \varphi/2) - 2c \tan(45^\circ - \varphi/2) - \\ &\quad \sigma'_c [1 - \tan^2(45^\circ - \varphi/2)] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

当 $\sigma_3 = 0$, 有:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= 2c \tan(45^\circ + \varphi/2) + \\ &\quad \sigma'_c [\tan^2(45^\circ + \varphi/2) - 1] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式 (11)、(12) 显示, 毛管水张力使土体抗压强度增加, 也即抗剪强度增大。

3.2 毛管水张力的消散和土体膨胀的过程

前已述及, 毛管水张力能提高土的强度, 须考虑如何使毛管水张力不消散。现研究地表层毛管水的消失过程。图 2 所示为深厚的粉土地层, 毛管水头为 h_c , 地下水位离地面为 h_w , $h_w \leq h_c$, 故实际的毛管水头 $h'_c = h_w$ 。地面的压力水头为 $-h_w$, 向下渐增, 至 $z = h_w$ 处压力水头为 0, 再向下压力水头为正。强降雨地面积水, 先解除地表部份的毛管水张力, 水再逐渐向下渗透使张力渐渐消失。按太沙基单向固结方程^[6], 应用分离变数法和傅里叶积分求得各时序压力水头分布式为

$$\left. \begin{aligned} h &= h_0 + h'_c \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{c_s t}}\right) \\ \operatorname{erfc}(\xi) &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\xi}^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi \\ c_s &= \frac{k}{m_s \gamma_w} \\ I &= \frac{-h'_c}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{c_s t}} e^{-\frac{z^2}{4c_s t}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中： $\operatorname{erfc}(\xi)$ 为余误差函数； h_0 为初始的压力水头； I 为包括压力水头和位置水头的坡降； z 为深度； t 为时间； k 为渗透系数； m_s 为体积膨胀系数。设 $h_c = 450$ cm, $h'_c = h_w = 400$ cm, $k = 1 \times 10^{-4}$ cm/s, $m_s \gamma_w = 1 \times 10^{-5}$ 1/cm, 据以计算出各时序的水头分布示于图2右方。从图可知, $t = 1$ d 地表的毛管水张力已基本消失, 接近静水压力。

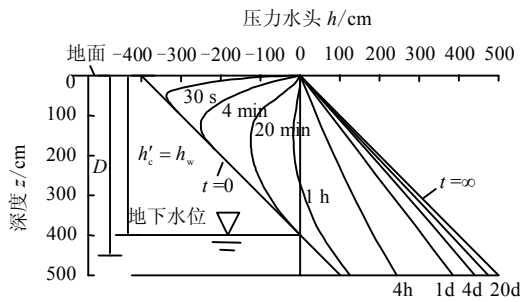


图2 强降雨条件下地表层毛管水张力的消散过程
Fig.2 Decreasing process of capillary water tension in surface strata under heavy rain condition

再计算一定深度 $z=D$ 以上地表层各时序的膨胀度。将式(13)的 $\operatorname{erfc}(\xi)$ 展为级数, 沿 z 积分自地表至 D , 得膨胀度 U_D 为

$$\left. \begin{aligned} U_D &= 1 - \frac{4\sqrt{c_s t}}{\sqrt{\pi D}} \left[\frac{1}{2} \xi_D^2 - \frac{1}{12} \xi_D^4 + \frac{1}{60} \xi_D^6 - \frac{1}{336} \xi_D^8 + \frac{1}{2160} \xi_D^{10} - \frac{1}{15840} \xi_D^{12} + \frac{1}{131040} \xi_D^{14} - \frac{1}{1209600} \xi_D^{16} + \dots \right]_{\xi_D} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\xi_D = \frac{D}{2\sqrt{c_s t}}$$

当 $\xi_D \leq 1.5$, 级数收敛快。设 $D=500$ cm, 计算出膨胀度 U_D 列于表1。 U_D 也代表地表层毛管水张力的消失程度。再按下式计算地表层各时序的膨胀量 S_D , 计算结果也列于表1。

$$S_D = D m_s \gamma_w h'_c U_D \quad (15)$$

表1 强降雨条件下地表层毛管张力消失和土体膨胀的过程

Table 1 Expansion process of surface strata accompanied with decreasing capillary water tension under heavy rain condition

t/h	U_D	S_D/cm	t/h	U_D	S_D/cm
0	0	0	96	0.924	1.85
1	0.415	0.83	480	0.966	1.93
4	0.653	1.31	∞	1.000	2.00
24	0.850	1.70			

如在图2所示的地层中开挖基坑, 遇到强降雨天气, 除地面外, 坑壁坑底也进水, 渗径短, 毛管水张力消失更快, 土体强度随之下降, 易引致坑壁坍塌。故须加强场地排水, 并用塑膜保护坑壁和附近地面, 以确保工程安全。

4 毛管水对渗流的影响

4.1 非饱和土的单向渗流

单向渗流示意图如图3所示。设渗透系数为 k , 孔隙率为 n , 饱和度为 S_r (n 、 S_r 均以小数计), 毛管水头为 h_c , 水量瞬时的平衡方程为

$$\frac{k}{n(1-S_r)} \frac{H_c + H + L \cos \theta}{L} dt = dL \quad (16)$$

式中： H 、 L 、 θ 的定义示于图3。

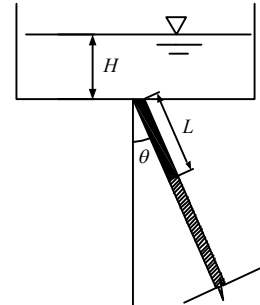


图3 非饱和土单向渗流示意图
Fig.3 Sketch of one-dimensional seepage of unsaturated soil

对式(16)积分, 并代入初始条件: $t=0$, $L=0$, 得

$$\frac{k}{n(1-S_r)} t = \frac{1}{\cos \theta} \left(L - \frac{H_c + H}{\cos \theta} \ln \frac{H_c + H + L \cos \theta}{H_c + H} \right) \quad (17)$$

当 $\theta = \pi/2$ 时, 有

$$\frac{k}{n(1-S_r)} t = \frac{L^2}{2(H_c + H)} \quad (18)$$

当 $\theta = 0$ 时, 有

$$\frac{k}{n(1-S_r)}t = L - (H_c + H) \ln \frac{H_c + H + L}{H_c + H} \quad (19)$$

当 $\theta = \pi$ 时, 有

$$\frac{k}{n(1-S_r)}t = (H_c + H) \ln \frac{H_c + H}{H_c + H - L} - L \quad (20)$$

式 (20) 中设 $H=0$, $S_r=0$, 这相当于干土在毛管水头测试仪中毛管水的上升过程。毛管水上升到稳定值 h_c 需要很长时间, 理论上 $t \rightarrow \infty$ 。为节省试验时间, 可在已测定的 $L-t$ 过程线中, 任选 3 点 t_1 、 L_1 , t_2 、 L_2 , t_3 、 L_3 ; 并设 $t_3-t_2=t_2-t_1$, 以试算法解出 h_c 和 k 。式 (19) 相当于强降雨地表的入渗过程, 可借以估算强降雨的入渗系数。式 (18) 可借以近似地计算堤基非饱和透水层土薄层在汛期的入渗过程。

4.2 毛管水对堤坝渗流流态的影响

为阐明毛管水饱和带对堤坝渗流的影响, 以一具体堤防工程为例, 如图 4 所示。堤基不透水, 堤身为粉性土, 毛管水头 $h_c=2.2$ m, 上游水深 $H=4.4$ m; 下游无尾水。先进行 1:40 的砂模试验, 模型干砂上升法的毛管水头为 $h_c=5.5$ cm, 再进行计入和不计入毛管水头的电拟试验, 并进行不计入毛管水头的理论计算^[7]。试验和计算的流量比 q/k 和出逸点高度 a_0 综合比较列于表 2。

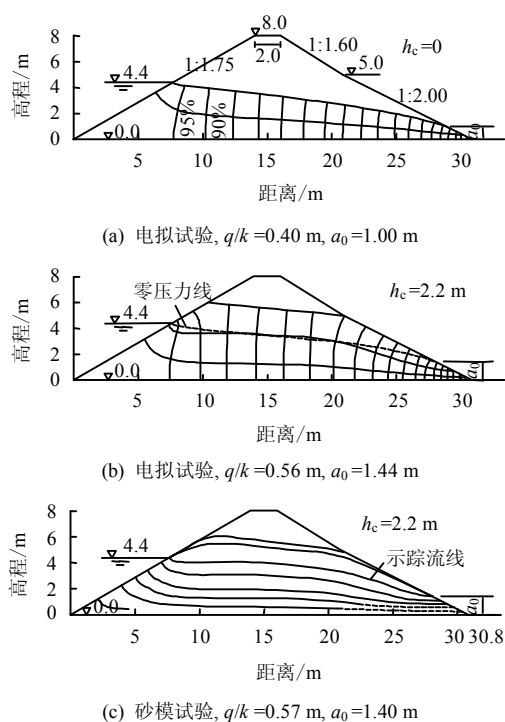


图 4 毛管水对堤坝渗流流态的影响

Fig.4 Influence of capillary water on seepage flow state of levees and dams

表 2 毛管水对堤坝渗流量和出逸点高度的影响

Table 2 Influence of capillary water on flow quantity and height of release point of levees and dams

测试方法	$\frac{q}{k} / \text{m}$		a_0 / m	
	计入毛细管	不计毛细管	计入毛细管	不计入毛细管
砂模试验	0.57		1.40	
电拟试验	0.56	0.40	1.44	1.00
理论计算		0.45		1.11

由表 2 可知, 毛管水的影响使堤防的单宽流量 q 和出逸点高度 a_0 均相应地增加 30%~40%, 约相当于比值 $h_c/(h_c+H)=2.2/(2.2+4.4)=0.33$ 。

5 毛管水的其他工程特性和现象

与深层相比, 软土地基的表层往往含水率较低而强度较高。这是由于表层长期暴露在大气中, 风干日晒, 水分蒸发, 土体产生毛管水张力使土体表层受压固结。这一过程俗称干燥固结; 深处则因排水不易, 在较长时期内基本上保持原先的孔隙水压力和土的性状。

深层取土, 天然压力解除, 如土骨架的天然压力小于 $h_c \gamma_w$, 那么土样可由毛管水张力保持其天然压力状态; 反之, 土样骨架要释放部分压力, 而仅保留压力 $h_c \gamma_w$ 。取土过程中, 土样如接触水, 将损失部分甚至全部毛管水张力, 以致试验测出的膨胀力和膨胀量偏小。故在取土过程中, 应尽量避免和水直接接触, 以保持土的原状。

试样浸水饱和, 毛管水张力解除, 将吸水膨胀, 破坏原状。故必须在试样上下两侧加透水石用对梢螺丝压紧, 以制止膨胀。取出试样前, 也必须用滤纸将透水石所含水分吸干, 防止试样吸水膨胀。

6 结 论

(1) 试验证明毛管水张力使土体压密固结, 强度提高, 强度提高的数值与分析计算相符。

(2) 提出深厚粉土层在雨季毛管水张力消失过程的计算式。

(3) 据砂模试验、电拟试验和分析计算, 提出毛管水使土坝的渗流量比 q/k 和出逸点高度 a_0 增高的近视计算式。

(4) 根据试验资料整理出粉性土和砂性土毛管水上升高度 h_c 和渗透系数 k 新的经验计算式。

参 考 文 献

- [1] DE VIEST J M. Flow through porous media[M]. New York: Academic Press, 1969.